黄土高原矿区生态系统服务价值的时空变化
——以平朔矿区为例

孟宪文[1,2]， 曹 君[3]， 薛占金[2]

（1. 太原旅游职业学院，山西 太原 030032；2. 山西大学资源与环境工程研究所，山西 太原 030006；3. 广东省环境科学研究院生态文明与绿色发展研究所，广东 广州 510000）

摘 要：开展矿区生态系统服务价值的时空分析对保护矿区生态环境、提升矿区生态系统功能具有重要意义。基于遥感数据和土地利用数据，采用3S技术、价值当量法和生态贡献度等方法，对黄土高原典型矿区——平朔矿区1990—2020年生态系统服务价值进行研究。结果表明：(1) 1990—2020年平朔矿区6种土地利用类型面积变化迥异，耕地面积减少最大(1122.72 hm^2)，建设用地面积增加最大(2044.23 hm^2)。(2) 平朔矿区生态系统服务价值呈先下降后上升态势，由1990年的19562.43×10^4元减少到2010年的11265.40×10^4元，再增加到2020年的15755.47×10^4元，1990—2010年下降的主要原因是建设用地和草地的生态系统服务价值大幅减少，2010—2020年增加的主要原因是矿区实施了大量生态恢复治理工程。(3) 1990—2020年平朔矿区除保持土壤价值增加外，其他各单项生态服务价值均有不同程度的减少，其中水源涵养、净化环境、生物多样性价值减少幅度较大，分别减少了115.84%、69.92%、18.29%。(4) 1990—2020年平朔矿区生态系统服务价值的空间分布呈现南北高、中部低的特征。(5) 平朔矿区草地、建设用地和林地的生态贡献度分别是-41.52%、-34.49%和-10.09%，三者是主要的贡献因子和敏感因子。

关 键 词：生态系统服务价值；时空变化；平朔矿区；黄土高原
文章编号：1000-6060(2024)03-0455-10(0455~0464)

生态系统是人类生存和繁衍的基础，为人类提供了赖以发展的环境条件和物质基础[1]。生态系统服务是指人类直接或间接从生态系统的结构、过程和功能中获取的各种产品和服务，一般分为供给、支持、调节、文化4类服务[2]。生态系统服务是联系人类活动和生态系统的桥梁和纽带，是研究人类系统-生态系统耦合的重点内容[3]。1970年Wilson首次提出“生态系统服务”概念，1997年Daily[4]和Costanza等[5]对该概念进行了系统研究，之后迅速引起国内外生态学、地理学和环境学等领域的专家学者广泛关注，不同空间尺度(全球[5]、国家[1]、省市[6-7]、县区[8]、盆地[9]、高原[10]等)和不同生态系统类型(城市[11]、农田[8]、河流[3,12]、森林[13]、草原[14]、湿地[15-16]等)下的生态系统服务相关工作得到普遍认识和研究，并取得较为丰硕的学术成果，这些成果主要集中在生态系统服务的价值评估[1,5,6,8,14-16]、服务类型[2,5,17]、时空格局[10,12]、权衡协同关系[3,7,9,18]、形成机制[7,18]、人类福祉[2,19]等方面。近年来，生态系统服务的研究由自然生态系统(如：湿地)延伸到半自然生态系统(如：农田)[20-21]。矿区是以资源开采为核心的一个独特的半自然半人工生态系统[22]，长期资源开采造成了土地损毁、水土流失、水体污染、植被退化等生态环境问题，极大地影响了矿区生态系统的土壤保持服务、产水服务、碳储存服务和生境质量等。有关生态系统服务的研究成果较少关注矿区这类特殊的生态系统，且现有的少量成果集中在土地类型

收稿日期：2023-07-15； **修订日期**：2023-08-28
基金项目：山西省自然科学基金项目(202303021221083)；山西文化旅游职业大学(筹)首批教学改革与实践研究项目(JG054)资助
作者简介：孟宪文(1969-)，女，硕士，副教授，主要从事资源持续利用研究. E-mail: mxw56789@sina.com
通讯作者：薛占金(1971-)，男，博士，主要从事生态修复与资源持续利用研究. E-mail: xuezhanjin@sxu.edu.cn

转化和生态脆弱性[20]、单个时间节点的定性分析和静态(或截面)研究[23],缺乏长时间序列矿区生态系统服务价值的时空格局分析[21]。矿区为社会经济发展提供了大量资源和能源,其生态系统服务研究正在引起学术界的关注。当前,亟需开展矿区生态系统服务价值动态变化的基础研究,以便更好地服务矿区资源开发利用与绿水青山保护的协同发展。

平朔矿区作为中国最大的露天煤矿开采区,是国内煤炭开采区生态系统变化的缩影,而且地处黄土高原边缘和北方农牧交错带,生态环境具有脆弱性和过渡性的双重特点,因此在平朔矿区开展生态系统服务研究具有显著的代表性和示范性。本研究利用遥感数据和土地利用数据,在3S技术支撑下,采用价值当量法和生态贡献度等方法,对1990—2020年平朔矿区的生态系统服务进行价值估算,定量表征1990—2020年平朔矿区生态系统服务价值的时空变化,这不仅可以为黄土高原矿区开展土地复垦和生态重建提供参考依据,而且可以拓宽生态系统服务的研究范围。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

本研究选取黄土高原典型矿区——平朔矿区为研究区域。平朔矿区(39°18′~39°37′N,112°10′~112°28′E)位于山西省北部的朔州市境内,总面积约380 km^2。气候类型为中温带半干旱大陆性季风气候,年均温5.0~7.5 ℃,年均降雨量410~450 mm,年均蒸发量1750~2550 mm,年均风速2.5~5.0 m·s^{-1}[24]。地貌类型为黄土丘陵,黄土分布广泛,再加上主要土壤类型为栗钙土和栗褐土,土壤有机质含量低、结构差、抗蚀能力弱,水蚀风蚀剧烈,是黄土高原的典型生态脆弱区[25]。平朔矿区作为中国五大露天煤矿之一,是国内煤炭开采时间最长、空间跨度最大的露天矿区。矿区探明地质储量约为126×10^8 t,是我国首批煤炭国家规划的19个矿区之一,区内有3座露天矿(安太堡露天矿、东露天矿、安家岭露天矿)和3座千万吨级现代化井工矿(井工一矿、井工二矿和井工三矿)(图1)。

1.2 数据来源

本研究所需的基础数据主要包括土地利用数据、土壤数据、社会经济统计数据等多源数据集(表1)。

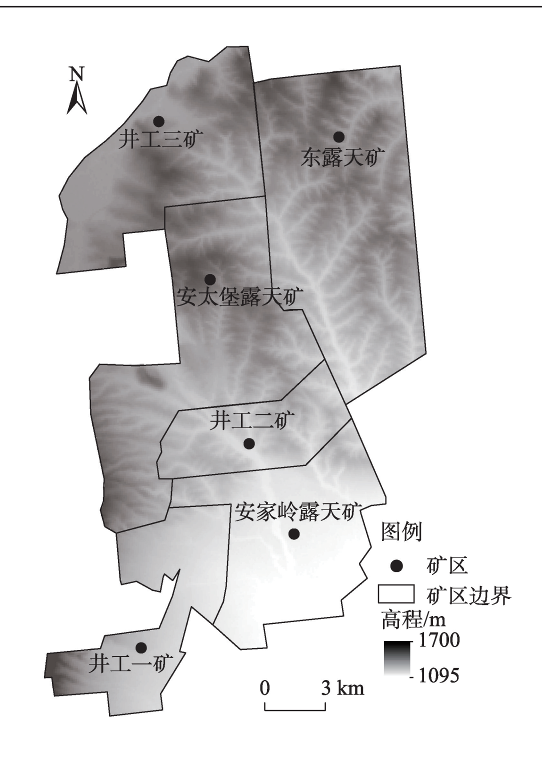


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

将以上数据利用ArcGIS 10.2工具箱中的样条函数插值工具(Spline)和数据转换工具(Conversion Tools)进行数据格式上的均一化处理,最终转换为分辨率30 m的栅格数据。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务价值估算方法 借鉴Daily和Costanza等评估生态系统服务价值的原理和方法[4-5],谢高地团队对国内200位生态学专家进行问卷调查,修订了耕地估计过低、湿地估计偏高等问题,先后于2003年和2008年制定了针对中国陆地的生态系统单位面积生态服务价值当量因子表[26-27]。2015年谢高地团队结合文献调研、专家知识和生物量等方法,修改和更新了价值当量因子表[28],这是国内目前最科学、最系统的价值当量因子表[29]。一个当量因子等于1 hm^{2}耕地1 a所产粮食的市场价值1/7[30]。考虑到生态系统服务具有时空异质性,为使研究结果更切合平朔矿区实际,本研究粮食单产量采用2020年平朔矿区平均粮食单产量(5425.50 kg·hm^{-2}),粮食价格采用2020年全国玉米(平朔矿区主要粮食作物是玉米)最低收购价格(1.20元·kg^{-1})。经计算,平朔矿区生态系统服务价值的一个当量因子为930.09元·hm^{-2}。根据当量因子表[29]和平朔矿区的

表1　研究数据信息

Tab. 1　Information of study data

数据类型	数据要求及处理	数据来源
土地利用数据	选取1990年和2000年Landsat TM影像、2010年和2020年Landsat OLI影像，空间分辨率均为30 m。利用Erdas 9.1软件的多波段遥感数据融合方法，对各期影像进行（TM 4-3-2波段合成，OLI 5-4-3波段合成）标准假彩色合成，二次多项式校正，最邻近法重采样，校正误差控制在1个像元以内[24]。利用ArcMap 9.3软件进行土地利用的人机交互判读与提取，解译显示精度控制为1∶100000，拓扑和改错处理在ArcInfo 9.3环境下完成，形成图形数据库和属性数据库[24]。为了提高解译结果的准确性，笔者于2020年9月20—25日进行野外实地调查，随机抽取不同地类各20个样点，进行GPS定位、相机拍摄景观照片，对照相应地点的遥感影像，现场确定地类，与解译结果进行对比分析，4期解译精度都在92%以上，满足研究要求。本研究土地利用划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地6大类	International Scientific Data Service Platform 网址为：http://datamirror.csdb.cn/
土壤数据	基于世界土壤数据库（HWSD）的中国土壤数据集（v1.1），分辨率为1 km	Harmonized World Soil Database 网址为：http://www.fao.org/
社会经济统计数据	粮食作物种类、面积、产量、价格等	《朔州市统计年鉴》《全国农产品成本收益资料汇编》及实地调研

当量因子值与自然条件，建设用地借鉴龙精华等[31]研究成果，可以得到平朔矿区各类土地生态系统服务价值系数（表2），进而计算出平朔矿区土地生态系统服务价值。计算公式为[28]：

$$ESV=\sum(A_x \times VC_x) \quad (1)$$

$$ESV_y=\sum(A_x \times VC_{xy}) \quad (2)$$

式中：ESV、ESV_y分别为平朔矿区土地生态系统的服务价值、第y项服务价值（元·a^{-1}）；A_x为平朔矿区第x种地类面积（hm^2）；VC_x、VC_{xy}分别为平朔矿区第x种地类生态系统的服务价值系数、第y项服务价值系数（元·hm^{-2}·a^{-1}）。

1.3.2　生态贡献度　生态贡献度表示在某一时间段内，各地类生态系统服务价值的变化量对平朔矿区总服务价值变化量的影响，可以揭示影响平朔矿区生态系统服务价值变化的主要贡献因子和敏感因子。计算公式为[32]：

$$CR_{it}=\frac{\Delta ESV_{it}}{\sum_{i=1}^{n}\left|\Delta ESV_{it}\right|}\times 100\% \quad (3)$$

式中：CR_{it}为第i类生态系统在t时间段内生态贡献度；ΔESV_{it}为第i类生态系统在t时间段内的生态系统服务价值变化量（元·a^{-1}）；n为地类（n=6）。

1.3.3　敏感性分析　引入经济学中基于弹性系数的敏感性指数（CS）定量描述平朔矿区生态系统服务价值变化对价值系数的依赖程度，以减少研究结果的不确定性。将各地类的价值系数分别调整50%，计算平朔矿区各地类的CS。计算公式为[32-33]：

$$CS=\left|\frac{(ESV'-ESV)/ESV}{(VC'_i-VC_i)/VC_i}\right| \quad (4)$$

式中：CS为敏感性指数；ESV、ESV′分别为调整前、

表2　平朔矿区各类土地生态系统服务价值系数

Tab. 2　ESV coefficients of each land use type in Pingshuo mining area　　/元·hm^{-2}·a^{-1}

一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	790.58	176.71	353.43	744.07	0.00	0.00
	原料生产	372.04	399.94	520.85	213.92	0.00	0.00
调节服务	气体调节	623.16	1131.43	1832.28	716.17	−831.90	167.42
	气候调节	334.83	3934.28	4845.77	2129.91	0.00	502.25
	水源涵养	251.12	3115.81	3552.94	95092.40	−8550.70	27.90
	净化环境	93.01	1190.52	1599.76	5161.99	−2087.80	93.01
支持服务	保持土壤	957.99	1599.75	2232.22	864.98	4455.90	18.60
	生物多样性	120.91	1460.24	2027.59	2371.73	0.00	18.60
文化服务	美学景观	55.81	641.76	892.89	1757.87	0.00	93.01
总　计		3599.45	13650.44	17857.73	109053.04	−7004.20	920.79

后的生态系统服务价值(元·a^{-1});VC_i、VC_i'分别为调整前、后第i类生态系统服务价值系数(元·hm^{-2}·a^{-1})。当CS<1时,表明ESV对于价值系数缺乏弹性,计算结果可信;当CS>1时,表明ESV对于价值系数富有弹性,计算结果准确性较差。CS的绝对值越接近0,准确性越高。

2 结果与分析

2.1 平朔矿区土地利用的时空变化

通过解译遥感影像,得到平朔矿区1990、2000、2010年和2020年土地利用现状图(图2)和土地利用统计表(表3)。

从图2可以看出,过去30 a间6种地类的空间分布格局,耕地始终是主要地类,且空间分布变化不大。受煤炭露天开采的扰动,2000—2010年安太堡露天矿、东露天矿和安家岭露天矿的部分耕地转化为建设用地和未利用地,从中部出现并逐渐向东部、东北部扩展。林地、草地主要分布在井工一矿和井工三矿,但井工一矿的林地和草地转化为耕地,井工三矿的林地和草地逐渐转化为建设用地和未利用地。这种变化格局充分体现了平朔矿区从农业为主向农工矿业并重的转变,使得本区成为具有农工矿特色的半自然半人工生态系统结构。2010—2020年平朔矿区加大土地复垦和生态修复力度,复垦区逐渐恢复为耕地和林草地,植被覆盖率达到90%以上,建设用地面积缩减,实现了从荒山废坑向绿水青山的跨越。

从变化规模来看(表3),1990—2020年平朔矿区的耕地面积最大,占矿区总面积的70%以上。随着煤炭开采力度的加大和城镇建设步伐的加快,1990—2010年耕地、草地和林地面积分别减少了4081.29 hm^2、1499.50 hm^2、568.95 hm^2,相比之下,建设用地、未利用地和水域均处于增长状态,最为显

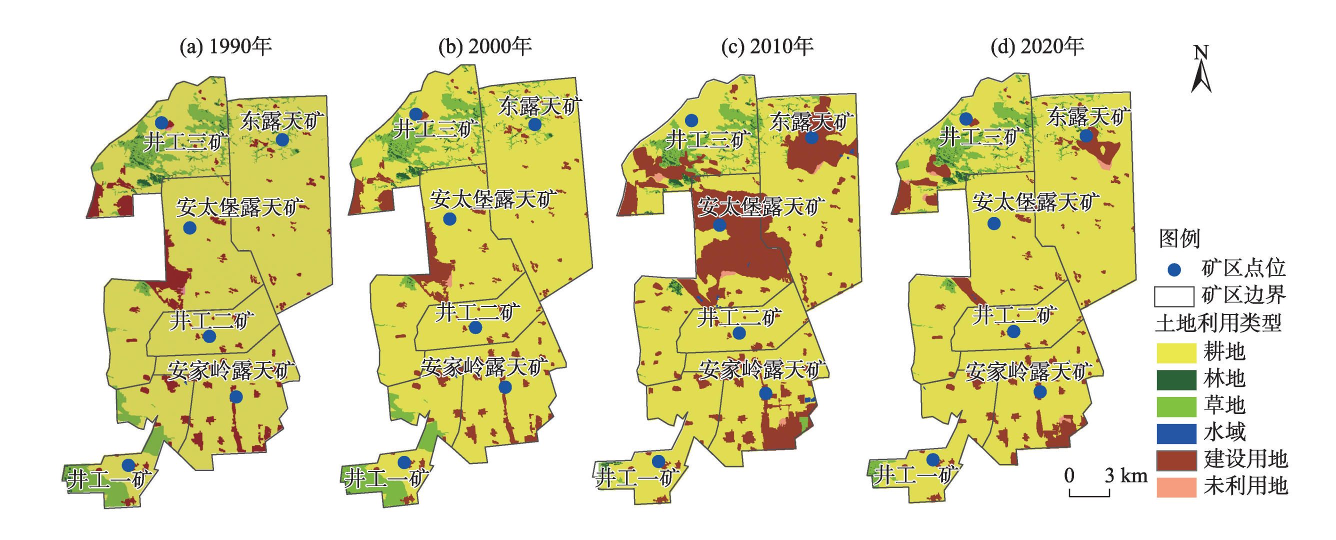


图2 1990—2020年平朔矿区土地利用现状

Fig. 2 Present situation of land use in Pingshuo mining area from 1990 to 2020

表3 1990—2020年平朔矿区土地利用变化

Tab. 3 Changes of land use in Pingshuo mining area from 1990 to 2020

类型	1990年		2000年		2010年		2020年	
	面积/hm^2	比例/%	面积/hm^2	比例/%	面积/hm^2	比例/%	面积/hm^2	比例/%
耕地	31734.81	83.51	31234.12	82.19	27653.52	72.77	30612.09	80.56
林地	1042.15	2.74	950.15	2.50	473.20	1.25	735.03	1.93
草地	4103.62	10.80	3864.24	10.18	2604.12	6.85	3138.32	8.26
水域	2.12	0.01	5.13	0.01	63.25	0.17	15.04	0.04
建设用地	930.06	2.45	1632.12	4.29	6735.56	17.73	2974.29	7.83
未利用地	187.24	0.49	314.24	0.83	470.35	1.23	525.23	1.38
合计	38000.00	100.00	38000.00	100.00	38000.00	100.00	38000.00	100.00

著的是建设用地面积由1990年930.06 hm^2增加到2010年6735.56 hm^2，净增加5805.50 hm^2。2010—2020年耕地、草地和林地面积增加，而建设用地面积减少（−3761.27 hm^2）。从变化率来看，过去30 a间平朔矿区建设用地变化幅度最大，占比由2.45%上升到7.83%，增加了5.38%；耕地和草地变化幅度次之，变化率分别为−2.95%、−2.54%；林地、未利用地和水域变化幅度不明显。

2.2 平朔矿区生态系统服务价值的时间变化

2.2.1 *总价值的时间变化* 随着煤炭资源大规模开发，1990—2020年平朔矿区土地生态系统服务价值经历了先减少后增加的变化过程，由1990年（资源开采初期）的19562.43×10^4元减少到2010年的11265.40×10^4元，再增加到2020年的15755.47×10^4元，变化量为−3806.96×10^4元，变化率为−19.46%（表4）。耕地、林地、草地和建设用地的生态系统服务价值与平朔矿区土地生态系统服务总价值变化过程相似，变化量分别为−404.12×10^4元、−419.23×10^4元、−1723.80×10^4元、−1431.82×10^4元，变化率分别为−3.53%、−29.47%、−23.52%、−219.79%；水域和未利用地的生态系统服务价值变化量和变化率均为正数，但由于其面积和变化量较小，对平朔矿区土地生态系统服务总价值变化影响不大。总体来看，草地面积的减少和建设用地面积的增加，加之二者生态系统服务价值系数较高，草地和建设用地的生态系统服务价值变化量较大（合计−3155.62×10^4元），草地和建设用地的面积变化是平朔矿区生态系统服务总价值减少的主要原因。

从分时段来看，1990—2000年平朔矿区生态系统服务总价值变化量为−1180.50×10^4元，其中建设用地、草地变化量较大，分别为−491.74×10^4、−427.47×10^4元，变化率分别为−75.49%、−5.83%。2000—2010年总价值变化量为−7116.53×10^4元，其中建设用地、草地变化量较大，分别为−3574.55×10^4、−2250.29×10^4元，变化率分别为−31.26%、−32.61%。2010—2020年总价值变化量为4490.07×10^4元，其中建设用地、耕地变化量较大，分别为2634.47×10^4、1064.92×10^4元，变化率分别为55.84%、10.69%（表4）。可以看出，在3个研究时段内建设用地和草地的变化量最大，再次说明建设用地、草地的面积变化和价值量变化对平朔矿区生态系统服务价值变化造成了较大影响。其原因是，煤炭资源开采改变了原地貌，草地逐渐被工矿建设用地代替，导致草地退化，最终造成生物多样性减少，生态系统结构改变、功能退化和服务价值下降。

2.2.2 *单项价值的时间变化* 1990—2020年平朔矿区单项生态系统服务价值变化中，除保持土壤价值增加（11.88%）外，其他各项生态服务价值均有不同程度的减少，其中水源涵养、净化环境、生物多样性价值减少幅度较大，分别减少了115.84%、69.92%、18.29%（表5）。分时段变化中，1990—2000年平朔矿区单项生态系统服务价值减少最多的是水源涵养、净化环境和气候调节，分别减少了697.63×10^4元、197.74×10^4元、160.25×10^4元；2000—2010年单项价值减少最多的是水源涵养、净化环境和气体调节，分别减少了4496.92×10^4元、1325.72×10^4元、

表4 1990—2020年平朔矿区生态系统服务价值变化

Tab. 4 Changes of ESV in Pingshuo mining area from 1990 to 2020

类型	年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	合计
ESV/10^4元	1990	11422.79	1422.58	7328.13	23.12	−651.43	17.24	19562.43
	2000	11242.57	1296.99	6900.66	55.94	−1143.17	28.93	18381.93
	2010	9953.75	645.94	4650.37	689.76	−4717.72	43.31	11265.40
	2020	11018.67	1003.35	5604.33	164.02	−2083.25	48.36	15755.47
ESV变化量/10^4元	1990—2000	−180.72	−125.59	−427.47	32.82	−491.74	11.69	−1180.50
	2000—2010	−1288.82	−651.05	−2250.29	633.82	−3574.55	14.38	−7116.53
	2010—2020	1064.92	357.41	953.96	−525.74	2634.47	5.05	4490.07
	1990—2020	−404.12	−419.23	−1723.80	140.90	−1431.82	31.12	−3806.96
ESV变化率/%	1990—2000	−1.56	−8.83	−5.83	141.95	−75.49	67.80	−6.03
	2000—2010	−11.46	−50.19	−32.61	113.30	−31.26	49.71	−38.72
	2010—2020	10.69	55.33	20.51	−76.22	55.84	11.66	39.85
	1990—2020	−3.53	−29.47	−23.52	609.42	−219.79	180.51	−19.46

表5 1990—2020年平朔矿区单项生态系统服务价值变化

Tab. 5 Changes of individual ESV in Pingshuo mining area from 1990 to 2020

类型	年份	供给服务		调节服务				支持服务		文化服务	合计
		食物生产	原料生产	气体调节	气候调节	水源涵养	净化环境	保持土壤	生物多样性	美学景观	
ESV/10⁴元	1990	2672.49	1436.12	2773.31	3470.96	1805.05	884.37	4538.83	1368.78	612.52	19562.43
	2000	2623.05	1401.41	2631.78	3310.71	1107.42	686.63	4735.07	1301.71	584.15	18381.93
	2010	2291.34	1184.74	1706.02	2418.02	-3389.50	-639.09	6313.82	947.34	432.71	11265.40
	2020	2545.16	1332.07	2331.31	2864.51	-285.96	265.96	5078.33	1118.33	505.76	15755.47
ESV变化量/10⁴元	1990—2000	-49.44	-34.71	-141.53	-160.25	-697.63	-197.74	196.24	-67.07	-28.37	-1180.50
	2000—2010	-331.71	-216.67	-925.76	-892.69	-4496.92	-1325.72	1578.75	-354.37	-151.44	-7116.53
	2010—2020	253.82	147.33	625.29	446.49	3103.54	905.05	-1235.49	170.99	73.05	4490.07
	1990—2020	-127.33	-104.05	-442.00	- 606.45	-2091.01	-618.41	539.50	-250.45	-106.76	-3806.96
ESV变化率/%	1990—2000	-1.85	-2.40	-5.10	-4.60	-40.00	-22.40	4.32	-4.90	-4.60	-6.04
	2000—2010	-12.64	-15.46	-35.17	-26.96	-406.07	-193.07	33.34	-27.22	-25.92	-38.71
	2010—2020	11.07	12.44	36.65	18.46	-91.56	-141.61	-19.56	18.04	16.88	39.85
	1990—2020	-4.76	-7.24	-15.93	-17.47	-115.84	-69.92	11.88	-18.29	-17.43	-19.46

925.76×10⁴元；2010—2020年除了土壤保持价值外，其他单项价值均有所增加，增加最多的是水源涵养、净化环境和气体调节，分别增加了3103.54×10⁴元、905.05×10⁴元、625.29×10⁴元。总体来看，调节服务价值减少驱使平朔矿区生态系统服务总价值降低，而保持土壤价值的变化是由于建设用地减少了水土流失。

从平朔矿区单项生态系统服务价值的构成来看，过去30 a间各单项生态服务价值居于前4位的是：保持土壤、气候调节、食物生产和气体调节，四者价值之和占各年期土地生态系统服务总价值的70%以上，共同维护了平朔矿区生态系统服务的主要功能。

2.3 平朔矿区生态系统服务价值的空间变化

在ArcGIS 10.2软件中，基于栅格统计了1990、2000、2010年和2020年平朔矿区生态系统服务价值，根据服务价值高低分为5类，反映平朔矿区生态系统服务价值的空间变化（图3）。总体来看，平朔矿区生态系统服务价值呈现明显的南北高、中部低的特征，变化趋势与林地、草地和建设用地的分布基本一致。生态系统价值高值的区域分布在南部和北部部分地区，最高值位于井工一矿。生态系统服务价值的低值区域与建设用地、未利用地分布较为一致，主要分布于安家岭露天矿中部、东露天矿

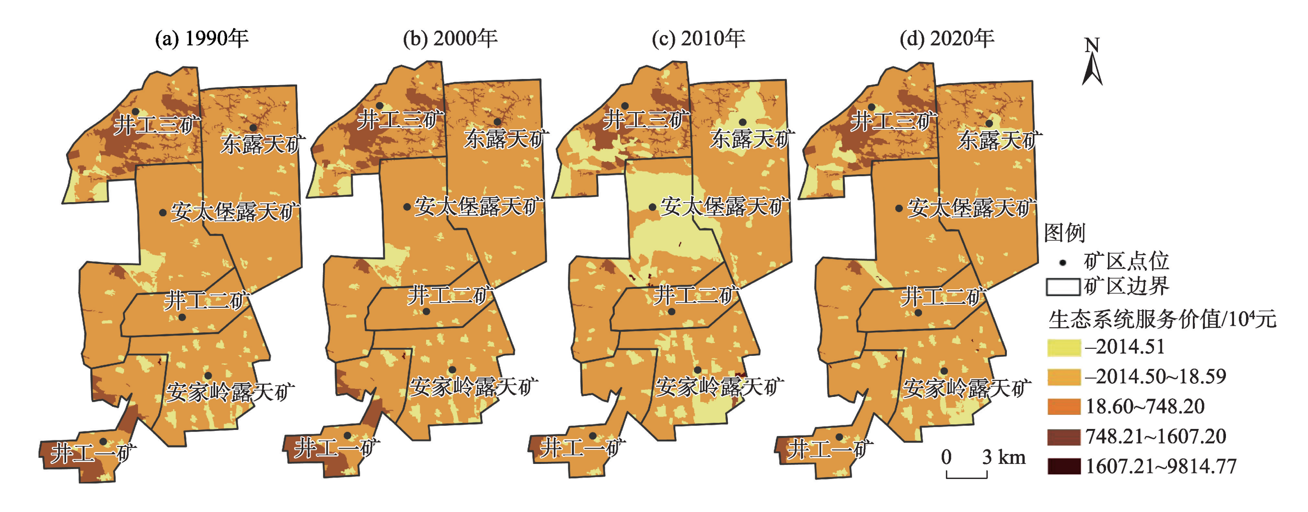


图3 1990—2020年平朔矿区生态系统服务价值空间变化

Fig. 3 Spatial changes of ESV in Pingshuo mining area from 1990 to 2020

北部和安家岭露天矿东南部。生态系统价值中值分布范围较广,主要分布在平朔矿区的中部和中南部,包括安家岭露天矿南部、东露天矿南部、井工二矿、安家岭露天矿北部。

从分时段来看,1990—2000年平朔矿区生态系统服务价值的空间分布变化不大,主要原因是处于煤炭资源开采初期,对生态系统结构和功能的影响尚未体现出来;2000—2010年随着安太堡露天矿持续开采和东露天矿建设,大面积耕地转化为建设用地,生态系统价值低值区域在两矿出现并扩展;2010—2020年生态系统价值低值区域呈缩减趋势,原因是矿区大力实施了生态环境治理和土地复垦等工作,部分建设用地恢复为耕地和林草地。可以预见,未来一段时间,随着矿区生态环境治理持续推进,生态系统服务价值的下降趋势将得到扭转。

2.4 平朔矿区的生态贡献度

从1990—2020年平朔矿区不同地类生态系统服务价值变化的贡献度(表6)可以看出,草地、建设用地和林地的生态贡献度最大,分别为-41.52%、-34.49%、-10.09%。平朔矿区生态贡献度总和为-91.71%,过去30 a间生态系统服务价值减少了3806.96×10^4元,降幅为19.46%。导致生态系统服务价值损失的地类有建设用地、草地、林地和耕地,生态贡献度之和为-95.84%,建设用地、草地和林地是主要的负向贡献因子;导致生态系统服务价值增益的地类有水域和未利用地,生态贡献度之和为4.13%,水域是主要的正向贡献因子。建设用地、草地和林地是平朔矿区生态系统服务价值变化的主要贡献因子和敏感因子。分析3个研究时段中不同地类的生态贡献度,也可得出同样的结论。

2.5 平朔矿区的敏感性分析

从敏感性指数计算结果可以看出(表7),价值系数调整50%后,平朔矿区不同地类的敏感性指数区别较大,但同一地类不同年份之间差别不大,且各时期敏感性指数均小于1。1990—2020年平朔矿区耕地的敏感性指数最高,其范围为0.584~0.884,即当价值系数增加10%时,生态系统服务总价值增加5.84%~8.84%;未利用地敏感性指数最低,接近0;当未利用地的价值系数增加10%时,生态系统服务总价值最大增加0.04%,波动较小。由此得出,平朔矿区生态系统服务总价值对价值系数缺乏弹性,本研究所采用的价值系数符合平朔矿区的实际情况,研究结果可信。

3 讨 论

本研究基于遥感数据和土地利用数据,采用3S技术得到1990—2020年平朔矿区土地总面积不变的情况下,各地类面积发生了较大变化(耕地等减少和建设用地等增加)。在国家政策的引导下,平朔矿区的露天煤矿相继投产(安太堡露天矿1987年投产,安家岭露天矿2005年投产,东露天矿2016年投产),原煤产量由1990年的1250×10^4 t增加到2020年的8100×10^4 t,人口同期增加了7.20×10^4人(https://pingshuo.chinacoal.com/)。为了满足煤炭业的发展和居民的需求,当地政府增加建设用地用来建设厂

表6　1990—2020年平朔矿区不同地类生态系统服务价值变化的贡献度

Tab. 6　Contribution rates of changes in ESV of different land use in Pingshuo mining area from 1990 to 2020　/%

年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
1990—2000	−14.23	−9.89	−33.66	2.58	−38.72	0.92
2000—2010	−15.31	−7.73	−26.74	7.53	−42.48	0.17
2010—2020	19.22	6.45	17.21	−9.48	47.54	0.09
1990—2020	−9.74	−10.09	−41.52	3.39	−34.49	0.74

表7　1990—2020年平朔矿区生态系统服务价值敏感性指数

Tab. 7　Sensitive coefficients of ESV in Pingshuo mining area from 1990 to 2020

年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
1990	0.584	0.073	0.375	0.001	0.033	0.001
2000	0.612	0.071	0.375	0.003	0.062	0.002
2010	0.884	0.057	0.413	0.061	0.419	0.004
2020	0.699	0.064	0.356	0.010	0.132	0.003

矿、交通道路和生活设施等。这种土地利用变化格局与朱九龙[23]、龙精华等[31]对2005—2012年河南义马煤矿矿区、1993—2013年黑龙江省鹤岗矿区土地利用变化研究成果一致。

无论Costanza等[5]提出的生态系统服务价值系数法,还是谢高地等[28]修改和更新后的价值当量因子表,对大尺度生态系统服务研究较为可信,但在小尺度研究中由于各种自然因素和人文要素差异较小,研究结果存疑较多。近年来,不同学者[6-7,9,31-32]采用修正后的单位面积价值当量法对不同区域进行生态系统服务价值评估且得到了较为准确的评估结果。本研究以价值当量法为基础,结合平朔矿区实际情况,利用1990—2020年粮食价值对当量进行修正,与生态系统服务价值的静态估算方法[20,23]相比,计算结果更具有准确性、全面性和分析性,得到1990—2020年平朔矿区生态系统服务价值呈现先下降后上升趋势,空间上呈现南北高、中部低的分布特征,这种矿区生态系统服务的时空格局具有鲜明的地域性和生态治理的必要性[19,23,31]。

矿区生态系统包含多个子系统、多种服务,且各服务之间相互联系、相互影响,任何一种生态系统服务的变化都会引起其他服务或正或负的变化。因此,基于本研究结果,未来将采用更科学的数据和模型深入挖掘平朔矿区土地利用变化和生态系统服务变化的驱动机制,为矿区复垦与生态重建及管理政策的制定提供科学依据。

4 结论

(1) 1990—2020年平朔矿区的耕地、草地和林地面积呈现缩减趋势,分别减少了1122.72 hm^2、965.30 hm^2、307.12 hm^2;建设用地面积扩展最大(2044.23 hm^2)。

(2) 弥补了生态系统服务研究较少关注矿区生态系统的不足,分析了长时间序列(30 a)矿区生态系统服务价值的时空格局。1990—2020年平朔矿区生态系统服务总价值呈先下降后上升态势,由1990年的19562.43×10^4元减少到2010年的11265.40×10^4元,再增加到2020年的15755.47×10^4元。平朔矿区除保持土壤价值增加外,其他各单项生态服务价值均有不同程度的减少。1990—2020年平朔矿区生态系统服务价值空间分布呈现南北高、中部低的特征,空间分布与林地、草地和建设用地的分布基本一致。

(3) 1990—2020年平朔矿区草地、建设用地和林地的生态贡献度最大,分别为-41.52%、-34.49%和-10.09%,三者是主要的贡献因子和敏感因子。1990—2020年平朔矿区的敏感性指数值均小于1,研究结果可信,表明基于当量因子修正方法计算获得的生态系统服务价值系数符合平朔矿区的实际情况。

参考文献(References)

[1] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Changsun, et al. The value of ecosystem services in China[J]. Resources Science, 2015, 37(9): 1740-1746.]

[2] MA (Millennium ecosystem assessment). Ecosystems and human well-being[M]. Washington, DC: Island Press, 2005.

[3] 钱彩云, 巩杰, 张金茜, 等. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 868-879. [Qian Caiyun, Gong Jie, Zhang Jinxi, et al. Change and tradeoffs-synergies analysis on watershed ecosystem services: A case study of Bailongjiang Watershed, Gansu[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 868-879.]

[4] Daily G C. Nature' s services: Societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington DC: Island Press, 1997.

[5] Costanza R, d'Arge R, Groot R. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.

[6] 马丽娜, 张飞云, 翟玉鑫, 等. 1980—2020年新疆土地利用变化下生态系统服务价值时空演变分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(2): 253-263. [Ma Lina, Zhang Feiyun, Zhai Yuxin, et al. Temporal and spatial evolution of ecosystem service value under land use change in Xinjiang from 1980 to 2020[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(2): 253-263.]

[7] Yuan Y, Bai Z K, Zhang J J, et al. Investigating the trade-offs between the supply and demand for ecosystem services for regional spatial management[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 325: 116591, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116591.

[8] 沈佳莹, 刘辉, 温小乐, 等. 高标准农田生态系统服务价值评估——以福建省永泰县同安镇片区为例[J]. 亚热带资源与环境学报, 2019, 14(4): 86-92. [Shen Jiaying, Liu Hui, Wen Xiaole, et al. Ecosystem service evaluation of high standard farmland: Taking some area of the Tong' an Town, Yongtai County, Fujian Province as an Example[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2019, 14(4): 86-92.]

[9] 郝梦雅, 任志远, 孙艺杰, 等. 关中盆地生态系统服务的权衡与协同关系动态分析[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 592-602. [Hao Mengya, Ren Zhiyuan, Sun Yijie, et al. The dynamic analysis of

trade-off and synergy of ecosystem services in the Guanzhong Basin[J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 592-602.]

[10] 汪晓珍, 吴建召, 吴普侠, 等. 2000—2015年黄土高原生态系统水源涵养、土壤保持和NPP服务的时空分布与权衡/协同关系[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 114-121. [Wang Xiaozhen, Wu Jianzhao, Wu Puxia, et al. Spatial and temporal distribution and trade-off of water conservation, soil conservation and NPP services in the ecosystems of the Loess Plateau from 2000 to 2015[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 114-121.]

[11] Ma S H, Wen Z Z. Optimization of land use structure to balance economic benefits and ecosystem services under uncertainties: A case study in Wuhan, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 311: 127537, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127537.

[12] Yang M H, Gao X D, Kadambot H M, et al. Spatiotemporal exploration of ecosystem service, urbanization, and their interactive coercing relationship in the Yellow River Basin over the past 40 years [J]. Science of the Total Environment, 2023, 858: 159757, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159757.

[13] 漆信贤, 黄贤金, 赖力. 基于Meta分析的中国森林生态系统生态服务功能价值转移研究[J]. 地理科学, 2018, 38(4): 522-530. [Qi Xinxian, Huang Xianjin, Lai Li. An empirical study of Meta-analytical value transfer of forest ecosystem services in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(4): 522-530.]

[14] Maestre F T, Bagousse P Y, Delgado B M, et al. Grazing and ecosystem service delivery in global drylands[J]. Science, 2022, 378: 915-920.

[15] 张翼然, 周德民, 刘苗. 中国内陆湿地生态系统服务价值评估——以71个湿地案例点为数据[J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4279-4286. [Zhang Yiran, Zhou Demin, Liu Miao. Ecosystem service valuation research of Chinese inland wetlands based on case study[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13): 4279-4286.]

[16] 江波, 陈媛媛, 肖洋, 等. 白洋淀湿地生态系统最终服务价值评估[J]. 生态学报, 2017, 37(8): 2497-2505. [Jiang Bo, Chen Yuanyuan, Xiao Yang, et al. Evaluation of the economic value of final ecosystem services from the Baiyangdian wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(8): 2497-2505.]

[17] Lester S E, Costello C. Evaluating tradeoffs among ecosystem services to inform marine spatial planning[J]. Marine Policy, 2013, 38: 80-89.

[18] Li F Z, Yin X X, Shao M. Natural and anthropogenic factors on China' s ecosystem services: Comparison and spillover effect perspective[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 324: 116064, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116064.

[19] 霍冉, 徐向阳, 高俊莲, 等. 煤炭资源型城市生态系统服务空间特征及其与居民福祉关系[J]. 土壤通报, 2020, 51(1): 31-39. [Huo Ran, Xu Xiangyang, Gao Junlian, et al. Spatial patterns of ecosystem services and their relationships with residents' well-being of coal resource-based cities[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(1): 31-39.]

[20] Pan H H, Wang J Q, Du Z Q, et al. Spatiotemporal evolution of ecosystem services and its potential drivers in coalfields of Shanxi Province, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 148: 110109, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110109.

[21] Blanco C F, Marques A, Bodegom P M. An integrated framework to assess impacts on ecosystem services in LCA demonstrated by a case study of mining in Chile[J]. Ecosystem Services, 2018, 30: 211-219.

[22] 白中科, 赵景逵, 李晋川, 等. 大型露天煤矿生态系统受损研究——以平朔露天煤矿为例[J]. 生态学报, 1999, 19(6): 870-875. [Bai Zhongke, Zhao Jingkui, Li Jinchuan, et al. Ecosystem damage in a large opencast coal mine: A case study on Pingshuo surface coal mine, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(6): 870-875.]

[23] 朱九龙. 河南义马煤矿矿区生态系统服务价值动态演化过程分析[J]. 地域研究与开发, 2016, 35(2): 145-149. [Zhu Jiulong. Analysis of dynamic evolution process of ecosystem service value of Yima coal-mining area in Henan Province[J]. Areal Research and Development, 2016, 35(2): 145-149.]

[24] 薛占金, 秦作栋, 程芳琴. 晋西北地区土地沙漠化时空格局及其驱动因素[J]. 中国环境科学, 2020, 40(12): 5428-5435. [Xue Zhanjin, Qin Zuodong, Cheng Fangqin. Spatial-temporal patterns and driving factors of aeolian desertification in northwest Shanxi Province[J]. China Environmental Science, 2020, 40(12): 5428-5435.]

[25] Xue Z J, Qin Z D, Li H J, et al. Evaluation of aeolian desertification from 1975 to 2010 and its causes in northwest Shanxi Province, China[J]. Global Planetary and Change, 2013, 107: 102-108.

[26] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196. [Xie Gaodi, Lu Chunxia, Leng Yunfa. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189-196.]

[27] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919. [Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911-919.]

[28] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254. [Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243-1254.]

[29] 薛明皋, 邢路, 王晓艳. 中国土地生态系统服务当量因子空间修正及价值评估[J]. 中国土地科学, 2018, 32(9): 81-88. [Xue Minggao, Xing Lu, Wang Xiaoyan. Spatial correction and evaluation of ecosystem services in China[J]. China Land Science, 2018, 32(9): 81-88.]

[30] 邓楚雄, 钟小龙, 谢炳庚, 等. 洞庭湖区土地生态系统的服务价

值时空变化[J]. 地理研究, 2019, 38(4): 844−855. [Deng Chuxiong, Zhong Xiaolong, Xie Binggeng, et al. Spatial and temporal changes of land ecosystem service value in Dongting Lake area[J]. Geographical Research, 2019, 38(4): 844−855.]

[31] 龙精华, 张卫, 付艳华, 等. 鹤岗矿区生态系统服务价值[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1728−1737. [Long Jinghua, Zhang Wei, Fu Yanhua, et al. The value of ecosystem services in Hegang coal mining area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1728−1737.]

[32] 张发, 玉素甫江·如素力, 艾尔肯·图尔逊. 基于土地利用的博斯腾湖流域生态系统服务价值时空变化[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5254−5265. [Zhang Fa, Rusuli Yusufujiang, Tuersun Aierken. Spatio-temporal change of ecosystem service value in Bosten Lake watershed based on land use[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5254−5265.]

[33] 黄木易, 方斌, 岳文泽, 等. 近20 a来巢湖流域生态服务价值空间分异机制的地理探测[J]. 地理研究, 2019, 38(11): 2790−2803. [Huang Muyi, Fang Bin, Yue Wenze, et al. Spatial differentiation of ecosystem service values and its geographical detection in Chaohu Basin during 1995—2017[J]. Geographical Research, 2019, 38(11): 2790−2803.]

Spatiotemporal changes of the ecosystem service value for mining area in Loess Plateau: A case of Pingshuo mining area

MENG Xianwen[1,2], CAO Jun[3], XUE Zhanjin[2]

(1. Taiyuan Tourism College, Taiyuan 030032, Shanxi, China; 2. Institute of Resources and Environmental Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 3. Institute of Ecological Civilization and Green Development, Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510000, Guangdong, China)

Abstract: Spatiotemporal changes in ecosystem service value are crucial for protecting the ecological environment and enhancing the ecosystem functionality within mining areas. Based on remote sensing and land-use data, ecosystem service value (ESV) was quantitatively analyzed in the Pingshuo mining area of the Loess Plateau of China from 1990 to 2020 using the 3S (GIS, RS, GPS) technique, a standard equivalent method, and ecological contribution rate. The results showed the following facts: (1) Shifts in land-use type from 1990 to 2020, notably the most substantial decrease occurring in farmland (1122.72 hm^2) and a corresponding increase in built-up land (2044.23 hm^2) to its highest. (2) A decline in total ESV from 19562.43×10^4 Yuan in 1990 to 11265.40×10^4 Yuan in 2010, primarily attributed to reduced ESV in built-up land and grassland. However, a subsequent increase to 15755.47×10^3 Yuan in 2020 was observed, which was attributed to the implementation of ecological programs. (3) Varied decreases in individual ESV components, with water retention, purified environment, and biodiversity values decreased by 115.84%, 69.92%, and 18.29%, respectively, over 1990—2020, excluding soil retention, which remained constant. (4) ESV spatial distribution in the Pingshuo mining area, exhibiting higher values in the north/south and lower in the middle. (5) Ecological contribution rates of grassland, built-up land, and forestland in 1990—2020, standing at −41.52%, −34.49%, and −10.09%, respectively. These factors emerged as the main contributors and sensitive elements in the Pingshuo mining area.

Key words: ecosystem service value; spatiotemporal change; Pingshuo mining area; Loess Plateau